معرفی تکنیکی جدید برای ارزیابی رفتار و تغییرحجم خاک‌های غیراشباع★

غلام‌حسن اسکندری(۱)	علی رئیسی استبرق(۲)	عباس سروش(۳)

چکیده *تعیین تغییرحجم خاک‌های غیراشباع در حین بارگذاری و تغییرمکش از مشکلات اساسی آزمایشگاهی برای این نوع خاک‌ها محسوب می‌گردد. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون تلاش‌های بسیاری برای ابداع ابزار آزمایشگاهی مناسب به‌منظور اندازه‌گیری تغییرحجم نمونه‌های غیراشباع خاک با دقت مناسب صورت گرفته است. این مقاله به شرح جزئیات و مزایای طراحی و ساخت یک دستگاه سه‌محوری با سلول دوگانه‌ی کاملاً خودکار برای اندازه‌گیری تغییرحجم نمونه‌های غیراشباع خواهد پرداخت. در ادامه، مراحل کالیبراسیون برای تغییرحجم ظاهری ناشی از انبساط اولیه و جذب آب و انبساط اتصالات مربوطه‌ی دستگاه مذکور نیز ارائه شده است. آزمایش بر روی نمونه‌های غیراشباع خاک متورم‌شوندهبرای تعیین منحنی مشخصه‌ی آب‌خاک در شرایط غیرایزوتروپیک انجام شد. نتیجه‌های به‌دست آمده نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب دستگاه ساخته شده می‌باشد.هم‌چنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک تابعی از اعمال بار وارد به نمونه می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی خاک غیراشباع، تغییرحجم، سلول دوگانه، کالیبراسیون، منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک، بارگذاری غیرایزوتروپیک.

A New Technique for Assessing Volume Change Behavior Of Unsaturated Soils

G. H. Eskandari	A. Raeesi	A. Soroush

Abstract *Determination of volume change of unsaturated soils during loading and suction change is one of the most important difficulties in testing unsaturated specimens. It is revealed from literature review that various attempts have been made to invent an apparatus that can be used in testing on unsaturated soil specimens, simply and accurately. In this research, details of design and manufacture of a fully automatic 3-axial apparatus is explained, that can be used in measurement of volume change in unsaturated soils. Calibration procedure is also explained. To determine SWCC, some tests were conducted in anisotropic conditions. Results confirm the operation of apparatus. It is shown that SWCC is a function of excreted load.*

Key Words Unsaturated soil, Volume Change, Double Cell, Calibration, Soil Water Characteristic Curve (SWCC), Anisotropic Loading.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۹/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۵/۱۲ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشجوی دکتری گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
(۲) استادیار گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
(۳) دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

خاک‌های غیراشباع متشکل از سه فاز جامد، آب و هوا می‌باشند. هر دو فاز آب و هوا در خصوصیات مکانیکی این خاک‌ها نقشی اساسی ایفا می‌کنند. تاکنون محققان متعددی از تحقیقات خود نتیجه‌گیری نموده‌اند که بیان خواص مکانیکی خاک‌های غیراشباع به‌وسیله‌ی‌دو تنش $(\sigma - u_a)$ و $S = (u_a - u_w)$ امکان‌پذیر است[1,34]. در این روابط σ تنش کل، u_a فشار هوای منفذی، u_w فشار آب منفذی و S مکش ماتریک است. در بیان خواص مکانیکی خاک‌های غیراشباع، پارامترهایمکش و تغییرحجم نقشی اساسی دارند. لذا لازم است قبل از ورود به بحث اصلی، در مورد این‌دو پارامتر توضیحات لازم ارائه گردد.

مکش ماتریک

به نیرویی که باعث بالا رفتن آب از لوله‌ی موئین می‌شود نیروی موئینگی، پتانسیل ماتریک و (در مکانیک خاک) مکش ماتریک می‌گویند که باعث نگه داشتن شدن ذرات خاک در کنار یکدیگر می‌شود. طبق تعریف، در مکانیک خاک، مکش ماتریک برابر است با تفاضل فشار هوا و فشار آب منفذی ($S = (u_a - u_w)$). این پارامتر در حالت طبیعی همواره مقداری منفی دارد و نقش بسیار مهمی در تغییرات رطوبتی و در نتیجه تغییرات حجمی و مقاومتی خاک ایفا می‌کند. برای اندازه‌گیری مکش خاک معمولاً از تانسیومتر، بلوک گچی، TDR و نوترون‌متر استفاده می‌شود. اما برای انجام آزمایش بر روی خاک‌های غیراشباع، لازم است که مکش‌های مورد نظر را در خاک ایجاد نمود. روش‌هایی که در مطالعات ژئوتکنیکی برای ایجاد مکش مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: روش اسمزی [40]، روش کنترل رطوبتی [12] و روش انتقال محوری[15].

روش اسمزی

این روش اولین بار توسط یک بیولوژیست [19] مورد استفاده قرار گرفته و سپس توسط یک خاکشناس [40] وارد مباحث علوم خاک شده و از آن‌جا به مطالعات محققین ژئوتکنیک [6, 16, 17] وارد شده است. در این روش، پس از قرار دادن خاک در غشای نیمه تراوا، در اطراف خاک یک محلول با غلظت و پتانسیل اسمزی مشخص قرار می‌دهند. در اثر اختلاف پتانسیل بین محلول و خاک مرطوب، یک گرادیان انرژی در دوطرف غشا ایجاد می‌شود و در نتیجه باعث حرکت آب از نمونه به سمت محلول می‌گردد و بدین ترتیب به خاک درون غشا یک مکش مشخص اعمال می‌گردد. به دلیل سهولت و ایمنی ماده‌ی پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG)، معمولاً از این مادهدر تهیه‌ی محلول مورد نظر برای ایجاد مکش استفاده می‌شود. مقدار فشار اسمزی در این حالت بستگی به غلظت محلول دارد. هرچه محلول غلیظ‌تر باشد فشار اسمزی ایجاد شده بیش‌تر خواهد بود. ماکزیمم فشار اسمزی که تاکنون برای محلول PEG گزارش شده است عددی بیش از ۱۰MPa بوده است. از آن‌جا که فشار هوای اطراف نمونه‌ی خاک در روش اسمزی در حد فشار اتمسفر باقی می‌ماند، مسیرهای تنش میدانی را با استفاده از این روش به‌تر می‌توان شبیه‌سازی نمود. به‌علاوه، در این روش بدون استفاده از هیچ‌گونه فشار سلولی می‌توان مکش‌های بسیار بالایی در خاک ایجاد نمود [7].

روش کنترل رطوبتی

بر اساس تعریف ترمودینامیکی که برای مکش کل ارائه شده است، با کنترل رطوبت نسبی فضای اطراف خاک می‌توان مکش کل خاصی را بر خاک اعمال نمود. در این روش، نمونه‌ای از خاک نزدیک به محیط ترمودینامیکی بسته‌ای که در آن محلول آبی با ترکیب شیمیایی خاص وجود دارد قرار داده می‌شود. باتوجه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی این ترکیب، رطوبت نسبی

مشخصی به محیط بسته اعمال می‌شود. انتقال رطوبت در این روش از طریق انتقال بخار بین محلول و نمونه‌ی خاک انجام می‌شود و زمانی که بخار در تمام محیط بسته به تعادل رسید مکش خاصی به نمونه اعمال می‌گردد. برای ایجاد مکش‌های مختلف در خاک می‌توان از یک محلول با غلظت‌های مختلف یا چند محلول اشباع مختلف از نمک‌های گوناگون استفاده نمود [12].

روش انتقال محوری

این تکنیک اولین بار توسط Hilf[15] ابداع شد و سپس به یکی از روش‌های متداول در مهندسی ژئوتکنیک مبدل شد. اساس روش انتقال محوری بر افزایش فشار هوا (u_a) قرار گرفته است و هدف از آن افزایش فشار آب منفذی ماتریک (u_w)به مقداری مثبت و ممانعت از وقوع کاویتاسیون در سیستم زهکشی دستگاه می‌باشد. ایجاد مکش در روش انتقال محوری، از طریق افزایش فشار فازهای آب و هوای منفذی در خاک به‌طور جداگانه انجام می‌شود. در این روش همواره فشار هوا از فشار آب بیش‌تر است. لذا، به‌منظور ممکن ساختن اعمال فشار آب منفذی به نمونه و درنتیجه ایجاد یک مکش خاص در آن، از یک سنگ متخلخل با ظرفیت ورود هوای بالا (High Air Entry Value) در قسمت زیر نمونه استفاده می‌شود. زمانی که این سنگ متخلخل اشباع باشد فقط اجازه‌ی عبور آب را می‌دهد و تا زمانی که فشار هوا از ظرفیت ورود هوای سنگ متخلخل بیش‌تر نشده باشد، از عبور هوای آزاد از خود جلوگیری می‌کند. این افزایش مکش، برای سرامیک ذوب‌شده و قالب‌ریزی شده (Sintered) می‌تواند تا ۱۵۰۰kPa ادامه داشته باشد[20]. ساده‌ترین کاربرد روش انتقال محوری در دستگاه صفحه فشار (Pressure Plate) مشاهده می‌شود. برای ایجاد یک مکش خاص در دستگاه صفحه فشار، نمونه بر روی صفحات اشباع با ظرفیت ورود هوای معین قرار داده می‌شود و فشار هوا از بالا به نمونه اعمال می‌گردد. آب خروجی از نمونه نیز در فشار اتمسفر قرار می‌گیرد و مقدار نسبی آن صفر در نظر گرفته می‌شود. لذا مقدار مکش ($u_a - u_w$) ایجاد شده برابر با فشار هوای اعمالی خواهد بود.

در روش انتقال محوری، هم فشار آب و هم فشار هوای منفذی به‌طور مستقل کنترل و اندازه‌گیری می‌شوند. این مسأله امکاناتی را به‌وجود می‌آورد تا بتوان آزمایش‌هایی تحت مکش ثابت و یا با تغییر مکش انجام داد. یکی از محدودیت‌های روش انتقال محوری مربوط به مقدار ماکزیمم مکشی است که می‌توان به نمونه‌ی خاک اعمال نمود. مقدار ماکزیمم مکش قابل استفاده در این روش به سیستم موجود برای اعمال فشار آب و هوا و نیز به ظرفیت ورود هوای سنگ متخلخل بستگی دارد.

بزرگ‌ترین مزیت این روش آن است که با استفاده از آن می‌توان، مکش را در نمونه‌های آزمایشگاهی طی زمان قابل قبول و به‌سهولت به‌میزان دلخواه رساند.

Bishop &Blight[2] مطالعه‌ای بر اثر روش انتقال محوری بر مقاومت برشی اندازه‌گیری شده در خاک‌های رسی متراکم شده انجام دادند. یافته‌های آن‌ها استفاده از روش انتقال محوری در اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک را تأیید نمود. برخی از محققان بر این باورند که در زمان استفاده از نتایج آزمایش‌هایی که در آن‌ها از روش انتقال محوری استفاده شده است بایستی به حالت فاز هوا برای تأیید نتایج مطالعات دقت نمود. زیرا روش انتقال محوری در مکش‌های زیاد و زمانی که فاز هوا در شرایط به‌هم پیوسته قرار دارد دارای اعتبار است[4,7,8]. اما آزمایش‌های خاص (Null Tests)که توسط Morgenestern and Fredlund [13] انجام شد اعتبار روش انتقال محوری در درجه‌اشباع‌های بالا را (در بازه‌ی ۸۳/۳ تا ۹۵ درصد)

تأیید نمود؛ یعنی بازه‌ای از مکش که فرض می‌شود فاز هوا در آن بازه به‌صورت غیرپیوسته (Occluded) در خاک ظاهر می‌شود. مطالعات Tarantino et. al[34] نیز روش انتقال محوری را در شرایطی که فاز هوا پیوسته است مورد تأیید قرار داده است.

به‌دلیل سهولت اندازه‌گیری و کنترل مکش در این روش نسبت به دیگر روش‌های موجود، بیش‌تر نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مورد خاک‌های غیراشباع با استفاده از همین روش انتقال محوری به‌دست آمده‌اند. بنابراین، در این مطالعه نیز همین روش برای ایجاد مکش مورد استفاده قرار گرفته است.

روش اندازه‌گیری تغییرحجم نمونه

معمولاً تعیین خواص مکانیکی خاک‌های اشباع و غیراشباع نیازمند تعیین تغییرحجم نمونه می‌باشد. در خاک‌های اشباع، تغییرحجم نمونه خاک معادل حجم آب ورودی یا خروجی از نمونه می‌باشد که در دستگاه‌های سه‌محوری قابل اندازه‌گیری است. تعیین تغییرحجم خاک‌های غیراشباع به‌علت وجود توأمان فازهای آب و هوا مشکل می‌باشد. به‌منظور تفسیر و بیان خواص مکانیکی این دسته از خاک‌ها، بایستی تغییرات حاصل در فازهای آب و هوا مشخص گردد (فاز جامد ثابت می‌ماند) تا بتوان تغییرحجم کلی نمونه را به‌دست آورد. معمولاً در دستگاه‌های سه‌محوری دو روش برای اندازه‌گیری تغییرحجم یک نمونه خاک غیراشباع وجود دارد که عبارتند از:

– اندازه‌گیری تغییرحجم مایع اطراف نمونه خاک که مبین تغییرحجم نمونه است.

– استفاده از ادوات تغییرشکل‌سنج محوری و شعاعی که از داده‌های آن‌ها تغییرحجم نمونه به‌دست می‌آید.

تاکنون محققان مختلفی کوشیده‌اند که سیستمی را ارائه نمایند که تغییرحجم این خاک‌ها را با دقت زیاد ارائه دهد [3,14,37].

Bishop & Donald [3] سلول دوگانه‌ای برای دستگاه سه‌محوری ارائه نمودند که دستگاه را به دو بخش سلول داخلی و سلول خارجی تقسیم می‌کرد. در این دستگاه از جیوه به‌عنوان مایع پرکننده‌ی سلول‌ها استفاده شده بود که تا نیمه سلول داخلی را پر می‌کرد. در قسمت بالایی سلول داخلی منفذی تعبیه شده بود که سلول داخلی را به سلول خارجی متصل می‌کرد و بدین طریق با برابر کردن فشار در سلول‌های داخلی و خارجی، تغییر حجم سلول داخلی را مرتفع می‌نمود. برای اندازه‌گیری تغییر حجم جیوه (که برابر با تغییر حجم نمونه فرض می‌شد) یک گلوله از جنس فولاد مقاوم در برابر زنگ زدن، به‌صورت شناور بر روی سطح جیوه‌ی سلول داخلی قرار داده شده بود و از طریق تعیین میزان تغییر مکان گلوله، تغییر حجم نمونه‌ی خاک در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شد. روش ایجاد مکش در این دستگاه، روش انتقال محوری بود.

لیکن به‌علت ارتباط بین دو سلول و نیز استفاده از مایع سنگین و سمی جیوه به‌عنوان سیال مورد استفاده در سلول‌ها و نیز مشکلاتی که در تعیین تغییرمکان گوی شناور در سلول داخلی وجود داشت، این دستگاه چندان مورد استقبال محققان قرار نگرفت.

Wheeler [34] دستگاه سه محوری با سلول دوجداره، مشابه‌دستگاه[3] Bishop and Donald ساخت، به‌طوری‌که دو سلول داخلی و خارجی هیچ‌گونه ارتباطی با یکدیگر نداشتند. در دستگاه ویلر، سلول داخلی و خارجی به‌طور کامل از هم جدا بودند و درون سلول‌های داخلی و خارجی از آب پر شده بود.به‌منظور جلوگیری از انبساط در سلول داخلی، فشارهای یکسانی به هر دو سلول وارد می‌شد. تغییرات حجم نمونه از طریق اندازه‌گیری میزان آب خروجی یا ورودی به سلول داخلی و به‌کمک یک بورت مدرج که به یک فشارسنج متصل بود اندازه‌گیری می‌شد. اعمال مکش در این دستگاه نیز بر اساس روش انتقال محوری

بود. این دستگاه دارای مزایای فراوانی نسبت به‌دستگاه بیشاپ و دونالد بود. به‌ویژه آن‌که به‌جای مایع سمی و سنگین جیوه از آب استفاده شده بود و سلول‌های داخلی و خارجی کاملاً از هم جدا شده بودند و لذا دقت اندازه‌گیری تغییر حجم بیش‌تر شده بود. به همین دلیل این دستگاه مورد استقبال محققان قرار گرفت.

Zakaria [39]،Sivakumar [32] و Sharma [31] دستگاه ساخته شده به‌وسیله‌ی Wheeler[37] را در کار تحقیقاتی خود مورد استفاده قرار دادند، البته با تغییراتی در سیستم زهکشی و ابزار اندازه‌گیری تغییرحجم آب ورودی به یا خروجی از نمونه. با این‌حال دستگاه ویلر ایراداتی نیز داشت که محققان بعدی برخی از این ایرادات را رفع نمودند. از جمله آن‌که صفحه‌ی بالایی (Top Plate) سلول‌های دستگاه از هم جدا بود و سلول داخلی کاملاً در سلول خارجی قرار می‌گرفت. پروخالی کردن سلول‌ها نیز از بالا انجام می‌شد. لذا هنگام قرار دادن نمونه در دستگاه و پرنمودن سلول از آب، هم تخلیه‌ی هوا به‌خوبی انجام نمی‌شد و هم زمان زیادی صرف پرنمودن سلول‌ها می‌شد. زیرا لازم بود سلول را در ظرفی پر از آب قرار بدهند و منتظر پرشدن آن بمانند. هم‌چنین نفوذ آب از سلول خارجی به سیستم بارگذاری محوری و زنگ زدن ساچمه‌های این بخش، باعث کاهش دقت اندازه‌گیری تغییرحجم بود[32]. مشکل موجود در سیستم اعمال بار محوری توسط Sivakumar [32] مرتفع گردید.

Cui and Delage [6] همان دستگاه را مورد استفاده قرار دادند و تغییراتی که در آن ایجاد نمودند عبارت بود از اضافه نمودن سیستم ایجاد مکش در نمونه به روش اسمزی و استفاده از هوای فشرده به‌منظور اعمال فشار همه جانبه.اما جدا بودن صفحه بالایی دو سلول تا زمان Sharma [31] ادامه داشت. وی بسیاری از ایرادات مطالعات قبلی را برطرف نمود که مهم‌ترین آن‌ها جدا کردن کامل سلول‌های داخلی و خارجی و استفاده از تنها یک صفحه‌ی بالایی برای آن‌ها بود. هم‌چنین تغییراتی در دستگاه ایجاد کرد تا پروخالی کردن سلول‌ها از پایین انجام گیرد و در صفحه‌ی بالایی منافذی برای تخلیه‌ی هوا تعبیه نمود. این عمل سهولت کار با دستگاه را بیش‌تر کرد و زمان پرکردن سلول‌ها را به میزان زیادی کاهش داد. اما بازهم مسائلی درباره‌ی دستگاه ساخته شده توسط وی وجود داشت؛ یکی استفاده از بورت برای اندازه‌گیری تغییرحجم آب ورودی به نمونه بود. زیرا تبخیر آب از بورت و انحنای سطح آب در آن دقت اندازه‌گیری را با سؤال جدی مواجه می‌کرد. استفاده از پارافین برروی سطح آب بورت هم خیلی به حل مشکل کمکی نکرد. چون پارافین هم در بورت به‌صورت مقعر قرار می‌گرفت. علاوه بر این، وی برای اعمال فشار به‌صورت تدریجی از وسایلی به نام Stepper Motor استفاده کرده بود. این وسیله در زمان اعمال فشار در یک جهت خوب عمل می‌کرد، اما با برعکس شدن تغییرجهت اعمال فشار، خطای فاحشی ایجاد می‌شد. ولی به‌طور کلی، دستگاه Wheeler [37] که در زمان Sharma[31] بسیاری از ایرادات آن مرتفع شده بود، از نقطه نظر آزمایشگاهی مزایای فراوانی داشت. Ng et al[27] به این نتیجه رسیدند که در دستگاه طراحی شده به‌وسیله‌ی Wheeler[37]، جذب آب به‌وسیله‌ی دیواره‌ی سلول داخلی اهمیت بسیار زیادی در تعیین حجم نمونه‌ی خاک دارد و لذا در طراحی خود، سلول داخلی را با دیواره‌ای آلومینیومی‌ساختند. آنان نیز برای اعمال فشار همه جانبه، از هوای فشرده استفاده نمودند. Padilla et al[28] با بررسی خود به این نتیجه رسیدند که ایجاد حباب هوا در زیر سنگ متخلخل Hig Air Entry Disk زیر نمونه،ایجاد خطای بسیار زیادی در تعیین حجم و سایر پارامترهای نمونه می‌نماید. لذا اقدام نمودند به ساخت دستگاهی مشابه محققان قبلی، لیکن با تعبیه‌ی یک سیستم شستشوی اتوماتیک برای

حذف حباب‌های هوای به‌وجود آمده در زیر سنگ متخلخل زیر نمونه.

Sivakumar[33] دستگاهی مشابه محققان قبلی ساخت، اما در طراحی او مجموعه سلول داخلی در سلول خارجی جا داده شد به‌طوری‌که در هنگام اعمال فشار انبساطی نه تنها در دیواره‌ی سلول، بلکه در صفحات بالایی آن صورت نپذیرد.[1] Arunasalam به این نتیجه رسید که برای جلوگیری از انبساط دیواره‌ی سلول و نیز جذب آب به‌وسیله آن، ضروری است یک سلول یک جداره از جنس استیل مورد استفاده قرار گیرد. وی از این روش در کار تحقیقاتی خود استفاده نمود. اما از اشکالات مهم این دستگاه، عدم مشاهده‌ی نمونه در طول آزمایش می‌باشد.

گروهی دیگر از محققان از دستگاه‌های سه‌محوری معمولی مجهز به تغییرشکل‌سنج‌های محوری (Axial Strainmeter) و شعاعی (Radial Strainmeter) برای تعیین تغییرحجم نمونه استفاده کردند و نتایجی نیز ارائه‌نمودند[5,6,9,18,21,26,30]. اندازه‌گیری تغییرشکل نمونه به ویژه تغییرشکل شعاعی فقط مبین تغییرشکل یک ناحیه‌ی خاص از نمونه است نه تغییرشکل کلی نمونه و از طرفی ممکن است تغییرشکل نمونه غیریکنواخت باشد. هم‌چنین اکثر تغییرشکل‌سنج‌ها فقط در یک محدوده‌ی خاص اندازه‌گیری تغییرحجم را ارائه می‌کنند (۱ درصد کرنش) و اگر بیش از آن محدوده در نمونه تغییرشکلی رخ دهد قادر به تعیین مقدار دقیق آن نمی‌باشند. از بررسی منابع می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که کاربرد سیستم سلول دوگانه در تعیین تغییرحجم نمونه نسبت به دیگر روش‌ها دقیق‌تر می‌باشد.

هدف از انجام این پژوهش نخست طراحی و ساخت یک دستگاه سه‌محوری دوجداره بود که معایب دستگاه‌های تاکنون ساخته شده را مرتفع نماید، و سپس انجام مراحل کالیبراسیون آن و نیز انجام آزمایش‌های تعیین منحنی مشخصه‌ی آب خاک برای نمونه‌ای رسی، تحت شرایط غیرایزوتروپیک.

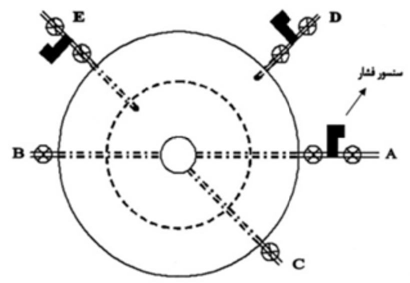
مواد و روش‌ها

با توجه به روش‌های اندازه‌گیری تغییرحجم نمونه درخاک‌های غیراشباع ونیز مکانیزم‌های مختلف ایجاد مکش در خاک که قبلاً بیان گردید، به‌نظر می‌رسد روش ابداعی wheeler[37] با مزایایی که ذکر شد مناسب‌ترین روش برای ایجاد مکش و اندازه‌گیری تغییرحجم باشد. لذا در این تحقیق، تغییراتی در یک دستگاه سه‌محوری معمولی که ویژه‌ی خاک‌های اشباع بود ایجاد گردید تا دستگاه در نهایت مناسب آزمایش بر روی خاک‌های غیراشباع گردد. مهم‌ترین این تغییرات عبارتند از افزودن یک سلول دیگر به‌دستگاه و تغییر در پدستال. در این بخش جزئیات دستگاه ساخته شده تشریح خواهد گردید.

صفحه‌ی پایینی دستگاه (Base Plate). تغییراتی که در صفحه‌ی پایینی یک دستگاه سه‌محوری معمولی ایجاد گردید تا مناسب آزمایش بر روی خاک‌های غیراشباع شود عبارتند از:

مسیرهای اعمال فشار آب و هوا. علاوه بر سه مسیر موجود در صفحه‌ی زیرین یک دستگاه سه محوری معمولی (مسیرهای A، C و D)، لازم است دو مسیر دیگر نیز به صفحه‌ی زیرین اضافه نمود (شکل ۱). از طریق مسیر A ، پس‌فشارمورد نظر به نمونه اعمال می‌گردد. همچنین از این مسیر آب به نمونه وارد یا از آن خارج می‌گردد. مسیر Bبرای خارج نمودن هوای تجمع‌یافته در زیر سنگ متخلخل پدستال مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عمل را در اصطلاح شستشو (Flushing) گویند. مسیرC در دستگاه سه‌محوری معمولی برای عبور آب زهکشی‌شده از نمونه استفاده می‌شود. اما در دستگاه سه‌محوری ویژه‌ی خاک‌های غیراشباع، این مسیر به‌منظور اعمال فشار هوا به‌کار برده می‌شود. مسیرهای D و E نیز به‌ترتیب برای پر و خالی

نمودن و نیز اعمال فشار در سلول‌های خارجی و داخلی در صفحه‌ی پایینی تعبیه شده‌اند. دایره‌ای که به‌صورت خط‌چین در شکل (۱) نمایش داده شده، شیاری است که برای قرار گرفتن سلول داخلی و عایق نمودن آن نسبت به سلول خارجی در صفحه تعبیه گردیده است.



شکل ۱ شکل شماتیک Base Plate دستگاه

در مسیرهای A، D و E سه عدد سنسور فشار قرار داده شد که از این طریق بتوان فشار آب را به‌ترتیب در نمونه، سلول خارجی و سلول داخلی به‌صورت لحظه‌ای مشاهده و ثبت نمود.

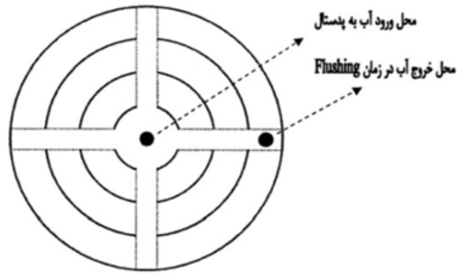
محل قرارگیری نمونه (Pedestal). پدستال در دستگاه سه‌محوری محلی است که در آن نمونه‌ی خاک قرار داده می‌شود. تغییراتی که در محل قرارگیری نمونه‌ی دستگاه سه‌محوری معمولی داده شد تا بتوان آزمایش‌های ویژه‌ی خاک‌های غیراشباع را انجام داد از این قرارند:

سنگ متخلخل زیر نمونه. سنگ متخلخلی که بر روی پایه‌یمحل قرارگیری نمونهدر دستگاه ویژه‌ی آزمایش بر روی خاک‌های غیراشباع استفاده می‌شود و نمونه بر روی آن قرار می‌گیرد بایستی ویژگی خاصی داشته باشد. زیرا برای ایجاد یک مکش خاص در نمونه، از بالای نمونه فشار هوا و از پایین آن فشار آب اعمال می‌گردد. سنگ متخلخل پایه بایستی بتواند آب را از خود عبور دهد اما مانع عبور هوا گردد. برای این منظور، در دستگاه ساخته شده در این مطالعه از یک سنگ متخلخل ویژه با ظرفیت ورود هوای ۵ اتمسفر استفاده شده است. قبل از شروع آزمایش‌ها بایستی این سنگ متخلخل اشباع شود. در این حالت، تا زمانی که فشار هوای اعمالی کم‌تر از ظرفیت ورود هوای سنگ متخلخل (۵ بار) باشد، هوا امکان عبور از سنگ را نخواهد داشت و تنها آب می‌تواند از سنگ گذر نماید. بدین‌طریق امکان ایجاد مکش مورد نظر درنمونه‌ی تحت آزمایش فراهم می‌گردد.

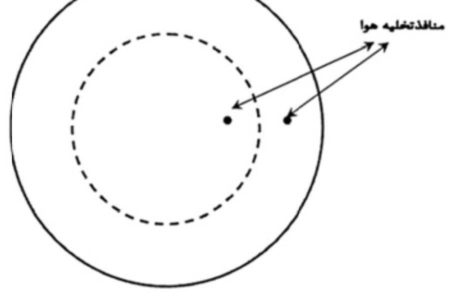
طراحی پایه‌ی محل قرارگیری نمونه. هرچند که در قسمت قبل ذکر شد که تا زمانی که فشار هوای اعمالی از ظرفیت ورود هوای سنگ متخلخل بیش‌تر نشود، امکان عبور هوا از سنگ متخلخل وجود ندارد، اما به دلیل عدم یکنواختی در سنگ در زمان ساخت در کارخانه و یا مسایل دیگر، ممکن است مقداری هوا بتواند از سنگ عبور نماید. به مرور زمان این حباب‌های هوا در زیر سنگ تجمع می‌کند و اندازه‌گیری تغییرحجم آب ورودی به یا خروجی از نمونه را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. لذا به‌منظور خارج نمودن هوای نفوذ کرده به زیر سنگ متخلخل پدستال، لازم است تغییراتی در پایه‌ی محل قرارگیری نمونه‌ی (پدستال) دستگاه سه‌محوری معمولی ایجاد گردد. در دستگاه مورد استفاده در این مطالعه، در زیر سنگ متخلخل نصب شده روی پدستال، فضایی تعبیه شده است که امکان چرخش آب را از طریق دوایر متحدالمرکزی که به‌وسیله‌ی شیارهایی باریک به هم متصل شده‌اند فراهم می‌آورد و از این طریق شستشوی هوای تجمع یافته به‌دقت و سهولت بیش‌تری انجام می‌شود شکل (۲). سپس از طریق مسیر B در شکل (۱)، این حباب‌های هوای تجمع‌یافته از محیط پدستال خارج می‌گردد.

صفحه‌ی بالایی دستگاه (Top Plate). شماتیک صفحه‌ی بالایی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل (۳) آمده است.

همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، دو تغییر عمده در صفحه‌ی بالایی ایجاد شده است. اول آن‌که شیاری برای قرار گرفتن سلول داخلی تعبیه شده (دایره خط‌چین) و دوم شیری به منظور تخلیه‌ی هوای سلول داخلی در زمان پر و خالی کردن دستگاه از آب، قرار داده شده است.



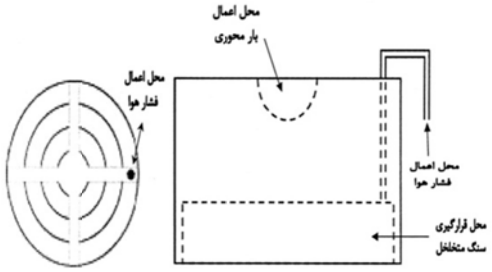
شکل ۲ نمایش پدستال از بالا



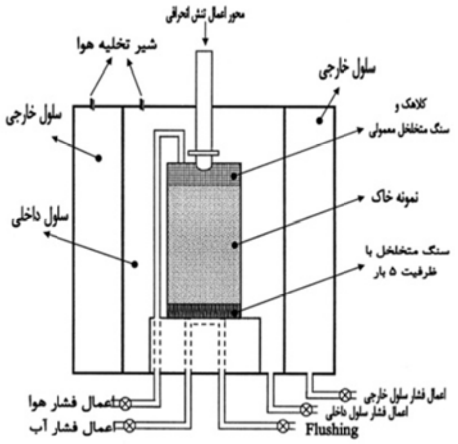
شکل ۳ شکل شماتیک Top Pate از بالا

کلاهک بالای نمونه (Top Cap)

در دستگاه سه‌محوری اصلاح شده برای آزمایش بر روی نمونه‌های غیراشباع، از کلاهک بالای نمونه برای اعمال بارمحوری به نمونه و نیز اعمال فشار هوا استفاده می‌گردد. شکل شماتیک کلاهک به‌کار برده شده در دستگاه مطالعه‌ی حاضر، در شکل (٤) آمده است. به‌منظور توزیع به‌تر فشار هوا در سطح نمونه، یک سنگ متخلخل معمولی درون کلاهک قرار داده شده و کف کلاهک مطابق شکل(٤ – ب) شیار داده شده است تا عبور هوا با سهولت بیش‌تری انجام پذیرد.شمای کلی دستگاه در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ٤ شکل شماتیک کلاهک بالایی. الف) از بغل،ب) از پایین



شکل ۵ نمای شماتیک سلول دستگاه

سیستم اندازه‌گیری تغییرحجم

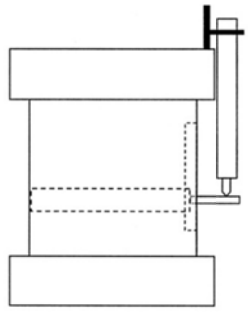
سلول دوگانه. روش اندازه‌گیری تغییر حجم نمونه در این دستگاه، اندازه‌گیری تغییر حجم مایع درون سلول داخلی دستگاه می‌باشد. همان‌گونه که در بخش ۱-۲ عنوان گردید، استفاده از تنها یک سلول در دستگاه منجر به ایجاد خطا در تعیین تغییر حجم نمونه خواهد گردید. زیرا افزایش یا کاهش فشار در سلول، علاوه بر آن‌که نمونه را تحت فشار همه جانبه قرار می‌دهد، باعث انبساط و یا انقباض خود سلول نیز خواهد گردید و درصدی از حجم آبی که به سمت سلول

فرستاده می‌شود یا از آن خـارج مـی‌شـود تـا فشـار در سلول را در حد ثـابتی نگـه دارد، در واقـع متعلـق بـه انبساط و انقباض سـلول و جـذب آب نمونـه اسـت و نمی‌توان آن را تماماً به تغییرحجم نمونه نسبت داد. لذا، به‌منظور حذف اثرات انبساط و انقباض سلول دسـتگاه و در نتیجه افزایش دقت اندازه‌گیری تغییرحجم نمونـه، سلول دوگانه‌ای برای دستگاه سه‌محـوری ایـن مطالعـه طراحی و ساخته شد. بدین ترتیب، دسـتگاه شـامل دو سلول داخلی و خارجی خواهد شد که نمونه در سلول داخلی قرار خواهد گرفت.

ضـخامت سـلول خـارجی ۲۰ میلـی‌متـر اسـت و به‌منظور افزایش مقاومت آن در برابـر فشـارهای وارده، اطراف آن نوارهای مقاوم‌کننده‌ای پوشانده شـده اسـت. ضخامت سلول داخلی ۷ میلـی‌متـر مـی‌باشـد. هـر دو سـلول از جـنس پـرپلکس و فاصـله‌ی بـین آن‌هـا ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. به‌منظور حذف هرگونه ارتبـاط بـین سلول‌های داخلی و خـارجی، در بـالا و پـایین سـلول داخلی شیارهایی برای قرار دادن رینگ حلقـوی تعبیـه گردید. هر کدام از سلول‌ها دارای یک شیر ورودی آب می‌باشند. علاوه بر این، یک مسیر شستشو برای خـارج نمودن هوای تجمع‌یافته در زیر سنگ متخلخل پدستال به‌کار برده شد (شکل ۱). هم‌چنین، یک شـیر تخلیـه‌ی هوا برای سلول خارجی و یک شیر تخلیه‌ی هـوا بـرای سلول داخلی تعبیه گردید تا در زمان پر نمودن سلول‌ها از آب، برای تخلیه‌ی هوا از سلول مورد اسـتفاده قـرار گیرد.

اگر فشار مایع سلول خارجی درست برابر با فشار سلول داخلی باشد، اخـتلاف فشـار در دیـواره‌یسـلول داخلی دستگاه به صفر می‌رسد و لذا هیچ‌گونه انقبـاض یا انبساطی در سلول داخلی (که سلول اصـلی دسـتگاه می‌باشد) رخ نخواهد داد. بدین طریق با یکسان کـردن فشار در سلول‌های داخلی و خارجی،عامل تغییر حجم سلول (داخلی)، که باعـث کـاهش دقـت انـدازه‌گیـری تغییرحجم نمونه‌ی خاک می‌شد، مرتفع می‌گردد. حـال می‌توان با اطمینان تغییر حجم مایع درون سلول داخلی را به تغییر حجم نمونه نسبت داد و با انـدازه‌گیـری آن به‌راحتی تغییر حجم نمونه در حـین انجـام آزمـایش را تعیین نمود.

تجهیزات اندازه‌گیری تغییرحجم. بـرای انـدازه‌گیـری تغییرحجم آب حفره‌ای نمونه و تغییرحجم آب موجود در سـلول داخلـی، از دو عـدد دسـتگاه انـدازه‌گیـری تغییرحجمConstant Volume Changeساخت شـرکت وایکهام‌فـرانس (Wykham France) انگلـیس اسـتفاده مـی‌شـود. در ایـن دسـتگاه، آب پـس از وارد شـدن به‌دستگاه، باعث جابه‌جایی صفحه‌یدیافراگمی می‌شـود که در میانه‌ی استوانه دسـتگاه قـرار دارد(شـکل ٦). بـا جابه‌جایی این دیافراگم، شاخصی که بـه ایـن دسـتگاه متصل است نیز تغییر مکان مـی‌دهـد. اگـر زمـانی کـه شاخص در پایین‌ترین نقطه قرار دارد (قبل از ورود آب به‌دستگاه) حجم عبوری را صفر بگیریم و زمانی که بـا ورود آب به‌دستگاه شاخص حرکت می‌کند تغییـرحجم آب را به روش‌های حجمی‌یا وزنی انـدازه‌گیـری کنـیم تـا شـاخص بـه بـالاترین نقطـه برسـد، و تغییـرحجم اندازه‌گیـری شـده در ایـن نقطـه را بـه‌عنـوان حـداکثر تغییرحجمی‌که توسط این دسـتگاه قابـل انـدازه‌گیـری است نسبت دهیم، آن‌گـاه مـی‌تـوان بـا برقـراری یـک رابطه‌ی خطـی بـین تغییـرحجم صـفر و تغییـر حجـم حداکثر، تنها با اندازه‌گیری میزان جابه‌جـایی شـاخص، تغییـــرحجم در دســـتگاه را محاســـبه نمـــود. دقـــت اندازه‌گیری تغییرحجم در این روش بسـتگی بـه دقـت تغییرمکان‌سنج استفاده شده دارد. دقت تغییرمکان‌سـنج مورد استفاده در این دستگاه معادل یک‌صدم میلـی‌متـر می‌باشد.



شکل ٦ نمای شماتیک تجهیزات اندازه‌گیری تغییرحجم

سیستم اعمال و اندازه‌گیری فشار

تجهیزات اعمال فشار. در این دستگاه برای ایجاد و اعمال فشار از دستگاه فشار ثابت ساخت شرکت وایکهام‌فرانس انگلستان استفاده شده است که می‌تواند تا ۳۵۰۰ کیلوپاسکال فشار (۳۵ بار) را ایجاد نماید.

تجهیزات اندازه‌گیری فشار. به‌منظور اندازه‌گیری مقادیر فشار در سلول‌های داخلی و خارجی و نیز اندازه‌گیری پس‌فشار، در این مطالعه از ۳ عدد حس‌گر اندازه‌گیری فشار استفاده گردید تا بتوان در هر لحظه تغییرات فشار در سلول داخلی، سلول خارجی و در مسیرپس‌فشار را ثبت نمود(شکل ۱). این سنسورها درست قبل از شیرهای باز و بسته کردن آب ورودی به سلول‌های داخلی، خارجی و زیرنمونه قرار داده شده‌اند. این سنسورها می‌توانند فشار صفر تا ١٦ بار را با دقت یک‌دهم اندازه‌گیری کنند و آن را به‌صورت خروجی ٤ تا ۲۰ میلی‌آمپر ذخیره نمایند. لذا با استفاده از این سنسورها می‌توان علاوه بر نمایش مقادیر فشار به‌صورت لحظه‌ای، آن‌ها را ثبت نمود.

مکانیزم افزایش و کاهش فشار. همان‌گونه که ذکر شد، در این مطالعه برای ایجاد مکش از روش انتقال محوری استفاده شده است. در این روش، فشار هوا و فشار آب به‌طور کاملاً مجزا در نمونه ایجاد می‌شود و اختلاف این دو فشار برابر با مکش ایجاد شده در نمونه خواهد بود. هم‌چنین گفته شد که برای افزایش دقت اندازه‌گیری، در این مطالعه از یک سلول دوگانه استفاده می‌شود که در آن فشار سلول خارجی بایستی همواره با فشار سلول داخلی برابر باشد. لذا به‌طور کلی سه دستگاه اعمال فشار مورد نیاز می‌باشد. به‌طوری که دو عدد مخصوص اعمال فشار به سلول‌های داخلی و خارجی می‌باشد و از سومین دستگاه برای اعمال فشار منفذی (u_w) استفاده می‌شود. فشار هوای منفذی نیز با استفاده از یک کمپرسور هوا ایجاد می‌شود و به‌کمک یک تنظیم‌کننده‌ی فشار هوا در مقادیر مطلوب تنظیم می‌شود. فشار آب منفذی از طریق اعمال پس فشار و فشار هوای منفذی از طریق کمپرسور هوا و تنظیم‌کننده ایجاد می‌گردد.مدت زمان ایجاد مکش بستگی به نوع خاک و مکش مورد نظر دارد. برای اعمال فشار به‌صورت تدریجی و اتوماتیک از یک مجموعه شامل یک موتور چرخنده که قابلیت اجرای برنامه‌های کامپیوتری را دارد (Servo Motor) و یک گیربکس ۱/۱۰۰ استفاده شده است. سروو موتورهای مورد استفاده در این دستگاه خاصیت دریافت فرمان را دارند و می‌توان از طریق یک برنامه کامپیوتری به آن‌ها دستور داد که از طریق ایجاد پیچش‌های ساعتگرد و پادساعتگرد در اهرم دستگاه فشار ثابت، فشار آب را در نمونه، سلول خارجی و یا سلول داخلی را تغییر دهد. وظیفه‌ی گیربکس ۱/۱۰۰ نیز آن است که چرخش سروو موتور را به یک‌صدم مقدار اصلی آن تغییر دهد.از این طریق می‌توان مدت زمان لازم برای ایجاد مکش در نمونه خاک را با تعیین نموهای دلخواه تنظیم نمود. این ویژگی در زمان آزمایش بر روی خاک‌های متورم‌شونده بسیار کارگشا خواهد بود. چرا که با افزایش یا کاهش رطوبت نمونه (تغییر مکش) در خاک های متورم‌شونده، شاهد تغییر حجم خواهیم بود که مهم‌ترین پارامتری است که بایستی اندازه‌گیری شود. با کاهش سرعت تغییر رطوبت و در نتیجه کاهش سرعت تغییرحجم، امکان پایش و اندازه‌گیری این

تغییرحجم ساده‌تر خواهد شد.

اندازه‌گیری بار محوری. برای اندازه‌گیری بار محوری از یک Load cell استفاده می‌شود. این Load cell توانایی اندازه‌گیری بار محوری تا ۲۰۰۰ کیلوگرم را دارد و دقت آن برابر با ۱ کیلوگرم می‌باشد.

نرم‌افزار مورد استفاده. از نرم‌افزار Easy Builder 4.40 برنامه‌ای به‌منظور کنترل فشارها و ایجاد تغییرات فشار به‌صورت تدریجی در سلول‌ها و آب حفره‌ای و ثبت آن‌ها و نیز ثبت تغییرحجم آب‌های ورودی یا خروجی و اندازه‌گیری تمامی پدیده‌ها و پارامترهای موجود در آزمایش استفاده گردید. این برنامه می‌تواند با سرعتی قابل کنترل، فشار سلول‌ها را از مقداری اولیه به مقداری دلخواه برساند و در صورت افزایش یا کاهش فشار مورد نظر از مقدار تعیین‌شده، به‌صورت خودکار فشار را به مقدار تنظیم‌شده برگرداند. لذا از طریق این برنامه می‌توان مطمئن شد که مقادیر فشار در تمام طول آزمایش در مقدار تنظیم‌شده ثابت باقی خواهد ماند. هم‌چنین قابلیت کالیبره‌ی مجدد برای سنسورهای فشار، تجهیزات اندازه‌گیری حجم و لودسل در این برنامه پیش‌بینی شده و لذا می‌توان در شروع هر آزمایش از کالیبره بودن کلیه‌ی قطعات و تجهیزات اطمینان حاصل نمود.

داده‌های ثبت شده در نهایت در یک ریزرایانه که برای کنترل اقدامات و ذخیره‌ی داده‌ها در نظر گرفته شده است، ذخیره شود و از طریق یک حافظه‌ی متحرک و نرم‌افزار مربوط می‌توان به فایل اکسل آن‌ها دست یافت.

کنترل درجه حرارت. با قرار دادن یک دماسنج در کنار دستگاه، دمای محیط حین آزمایش در حد دمای معمولی اتاق (۲۰ درجه سانتی‌گراد) نگه داشته می‌شود. اگر دما از حد مشخص شده بیش‌تر شود از یک فن برای متعادل کردن دما و در زمانی که دما به مقدار کم‌تر از این دما برسد، از یک هیتر برای رساندن دما به مقدار تعیین‌شده استفاده می‌شود.

کالیبراسیون دستگاه. قبل از شروع آزمایش لازم است که سنسورهای فشار، تجهیزات اندازه‌گیری حجم، سلول‌های دستگاه، لودسل و مسیر زهکشی کالیبره شوند.

کالیبراسیون Load cell. مقادیر حداقل و حداکثر Load cell از طریق برنامه نوشته‌شده برای دستگاه در نظر گرفته می‌شود و قبل از این‌که بار محوری به میله‌ی منتهی به Load cell اعمال شود، با گرفتن مقدار وزن Load cell و شافت متصل‌کننده‌ی آن به‌دستگاه، این مقدار وزن اولیه از اندازه‌گیری حذف می‌شود و لذا عدد خوانده‌شده‌ی نهایی در واقع برابر با میزان واقعی بار محوری اعمال شده است.

کالیبراسیون دستگاه فشار ثابت و سنسورهای فشار. به‌منظور کالیبراسیون دستگاه فشار ثابت، از یک گیج با دقت بسیار بالا استفاده می‌شود. ابتدا دستگاه در یک فشار دلخواه قرار داده میرشود و سپس با استفاده از این گیج میزان فشار دقیق با فشار نشان داده‌شده توسط دستگاه فشار ثابت مقایسه می‌شود و در صورت نیاز دستگاه فشار ثابت به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد که فشار دقیق را نشان دهد. پس از کالیبره کردن دستگاه‌های فشار ثابت، سنسورهای فشار متناسب با این دستگاه‌ها تنظیم می‌گردند.

کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری تغییرحجم. با توجه به توضیحات فوق، برای کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری حجم، تنها کافی است عدد مقدار حجم

صفر (زمانی که شاخص در پایین‌ترین نقطه قرار دارد)، و حجم حداکثررا (زمانی که شاخص در بالاترین نقطه قرار دارد) اندازه‌گیری نموده و در قسمت مخصوصی که در برنامه تعبیه شده است قرار داد. پس از آن برنامه به‌صورت خودکار یک رابطه‌ی خطی بین این دو مقدار برقرار می‌کند و تغییرحجم صورت گرفته قابل اندازه‌گیری خواهد شد. لازم به ذکر است زمانی که آب به سمت خارج سلول در حرکت است (حالت پایین آمدن شاخص– Flow down) عدد حجم اندازه‌گیری شده کمی بیش‌تر از حالتی است که آب وارد سلول (حالت بالا رفتن شاخص– Flow up) می‌شود.تفاوت جزئی مشاهده‌شده بین این دو حالت ناشی از پدیده‌ی پسماند است. در صورت لزوم، بایستی داده‌های برداشت‌شده را با توجه به این پدیده و از طریق در نظر گرفتن یک ضریب مناسب اصلاح نمود.

کالیبراسیون سلول دوگانه و مسیر زهکشی

کالیبراسیون سلول دوجداره. همان‌گونه که بیان گردید، حجم آب ورودی یا خروجی از سلول داخلی نشان‌دهنده‌ی تغییرحجم نمونه‌ی خاک غیراشباع می‌باشد. لیکن، تغییرحجم آب اندازه‌گیری مذکور بایستی اصلاح گردد. مقادیری که برای تصحیح آن به‌کار برده می‌شود تحت عنوان تغییر حجم ظاهری موسوم است که مقدار آن بایستی با انجام کالیبراسیون تعیین شود. تغییر حجم ظاهری معمولاً به عوامل زیر بستگی دارد[37]:

۱– انبساط اتصالات بین دستگاه‌های تأمین فشار و سلول دوجداره

۱– تغییرشکل صفحات بالا و پایین سلول

۲– تراکم آب در سلول

۳– جذب آب به‌وسیله‌ی دیواره‌ی سلول

بنابراین با انجام عمل کالیبراسیون، تغییرحجم ظاهری تعیین می‌گردد. قبل از عمل کالیبراسیون، با عبور آب بدون هوا از اتصالات مابین دستگاه‌های فشار ثابت و سلول دو جداره، هوای محبوس‌شده را باید خارج نمود. به همین صورت، ضروری است که از عدم نشت آب از اتصالات مذکور اطمینان حاصل نمود. این عمل با مسدود نمودن شیرهای ورودی بین اتصالات و سلول، و تحت فشار قرار دادن آن‌ها به‌وسیله‌ی دستگاه فشار ثابت، حداقل به‌مدت ۴۸ ساعت مشخص می‌شود. یک نمونه‌ی مصنوعی (Dummy Sample)، از جنس آلومینیوم و با ابعادی درست مشابه نمونه خاک مورد نظر، در پوشش لاستیکی قرار می‌گیرد و داخل سلول قرار داده می‌شود. سپس بالا و پایین آن به‌وسیله‌ی رینگ حلقوی به کلاهک بالایی و محل قرارگیری نمونه مسدود میرشود و انتهای لوله ورودی هوا نیز مسدود می‌گردد. دو سلول، از طریق یک منبع آب بدون هوا از آب پر می‌شود و تمهیدات لازم برای خروج حباب‌های هوای احتمالی از داخل سلول در نظر گرفته می‌شود. پس از انجام مراحل مذکور، فشار سلول‌های داخلی و خارجی به‌وسیله‌ی دستگاه‌های فشار ثابت، در ٤ مرحله (هر مرحله ۱۰۰ کیلوپاسکال) از صفر به ٤۰۰ کیلوپاسکال رسانده می‌شود. هر فشار اعمال شده به‌مدت حدود ٤۰ ساعت در سلول‌ها حفظ و نگه داشته می‌شود. در طول این مدت، داده‌های به‌دست آمده‌به‌صورت اتوماتیک ثبت می‌گردند. شکل(۷) تغییرات فشار را با زمان برای بارهای مختلف نشان‌می‌دهد. از نمودارهای مذکور نتیجه‌گیری می‌شود که تغییرحجم کلی ناشی از اعمال فشار را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود:

الف– تغییرحجم آنی ناشی از تغییر فشار آب سلول

ب– تغییرحجم ناشی از جذب آب به‌وسیله‌ی دیواره‌ی سلول که با زمان رابطه‌ی خطی دارد.

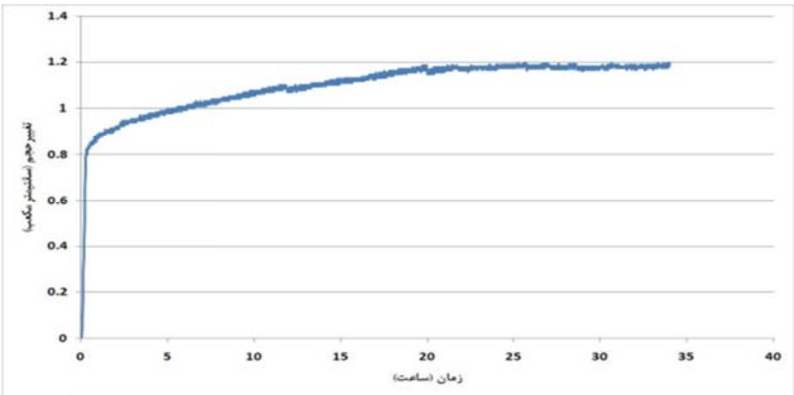
در نمودارهای فوق‌الذکر، به‌علت ثابت نگه داشتن دمای آزمایشگاه تغییرات حجم ناشی از تغییر درجه حرارت را می‌توان ناچیز فرض نمود.

بر اساس اطلاعات مستخرج از نمودارهای ارائه شده در شکل (۷)، تغییرات حجم آنی برای افزایش فشار سلول از صفر تا ٤۰۰ کیلوپاسکال تعیین شده و

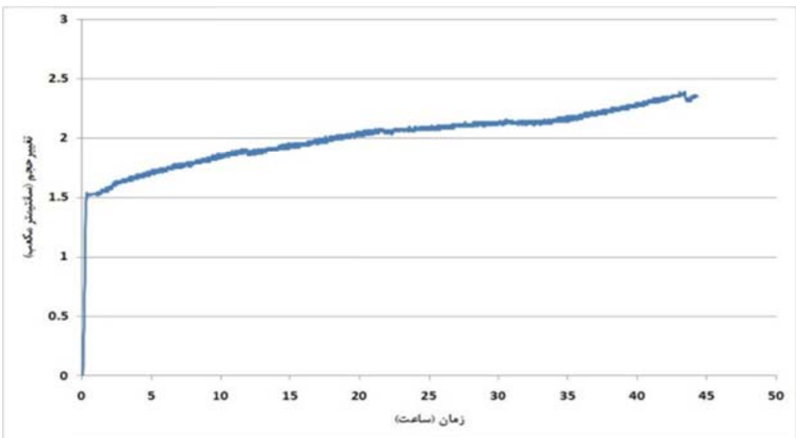
در شکل شماره (۸) نشان داده شده است. آن معادلـه‌ی ریاضی که تغییرات حجم آنی را با فشار سـلول نشـان مـی‌دهـد، از نـوع معادلـه‌ی درجـه دوم اسـت کـه در جدول(۱) ارائه گردیده است. شکل شـماره‌ی (۹) نیـز سرعت جذب آب بـه‌وسـیله‌ی دیـواره‌ی سـلول را در برابر فشار اعمال شده در سلول نشان می‌دهد. داده‌های این نمودار نیز از نتایج شکل (۷) به‌دست آمده‌اند.

همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده اسـت، سـرعت جـذب آب بسـتگی بـه فشـار سـلول دارد و رابطه‌ی آن با فشار، یک رابطه‌ی خطی اسـت (جـدول شماره‌ی ۱). این معادلات بـه‌دسـت آمـده از مرحلـه‌ی کالیبراسیون، برای تصحیح داده‌های تغییرحجم حاصـل از نتایج آزمایش به‌کار می‌روند.

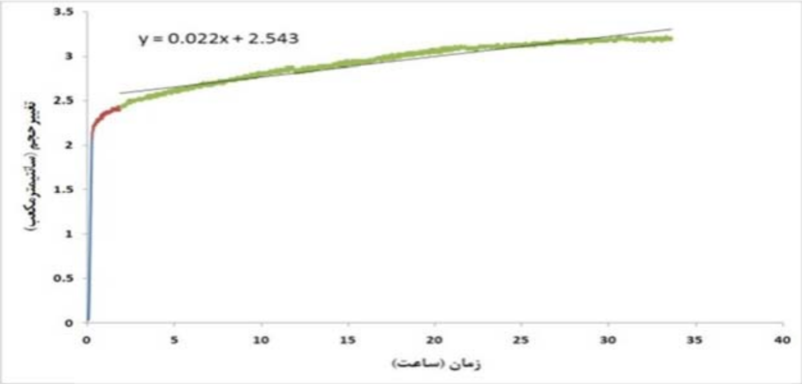
کالیبراسیون مسیر زهکشی. تغییـرحجم آب در نمونـه خاک معمولاً به‌وسیله‌ی لوله‌ی پلاسـتیکی کـه از کـف نمونه به‌دستگاه اندازه‌گیری تغییرحجم وصل شده است اندازه‌گیری می‌شود. اگر فشار داخل این مسیر در طول آزمایش تغییر کنـد موجـب انبسـاط لولـه و اتصـالات مربوط می‌گردد. بنابراین لازم است که کالیبراسیون لازم در این زمینه انجام شود تا امکـان تصـحیحات لازم در خصوص میزان آب ورودی یا خروجی از نمونه فراهم گردد. شکل (۱۰) منحنی کالیبراسیون مسیر زهکشی بـا فشاراعمال شده را نشان می‌دهد. معادله‌ی ریاضی برای تعیین اثر فشار با تغییر حجم بـرای مسـیر زهکشـی در جدول شماره‌ی (۱) ارائه شده است.



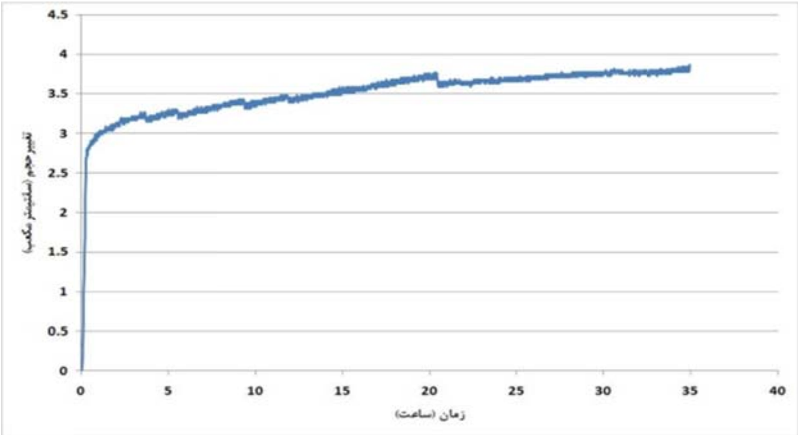
(الف)



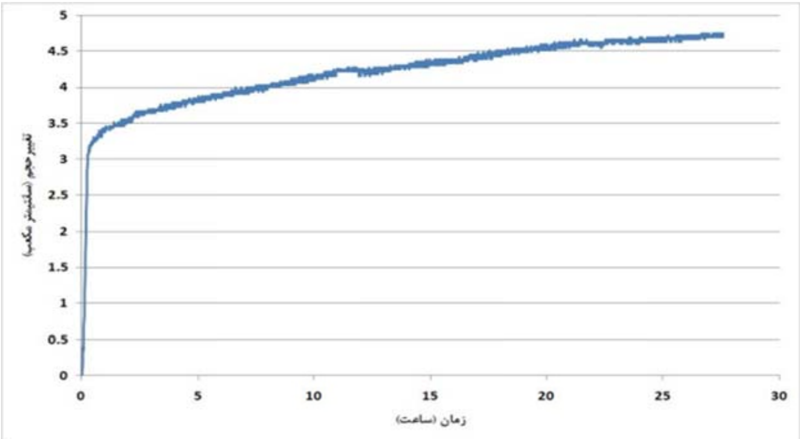
(ب)



(ج)



(د)

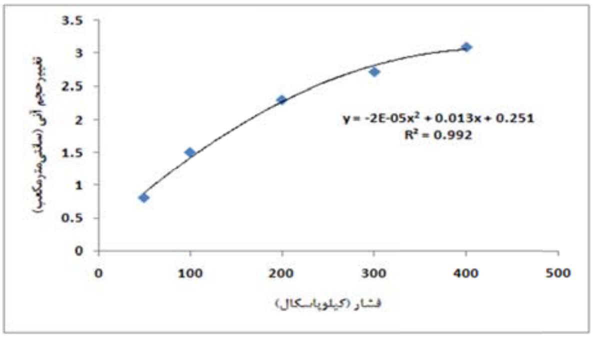


(هـ)

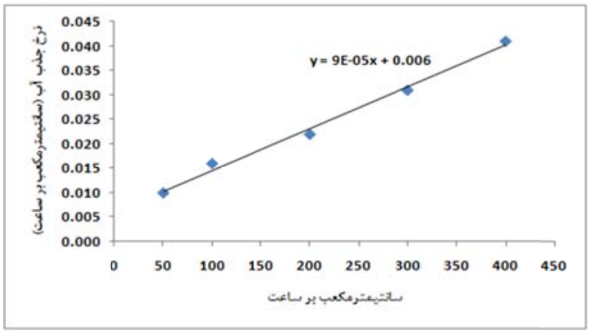
شکل ۷ نمودار تغییرحجم در مرحله‌ی کالیبراسیون برای فشارهای مختلف در سلول داخلی

جدول ۱انواع کالیبراسیون و معادله‌های مربوط

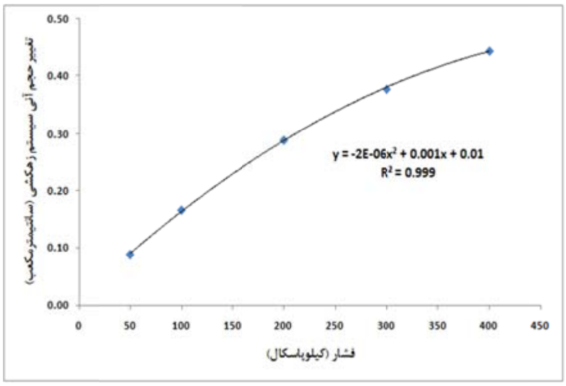
ضرایب معادله کالیبراسیون	معادله کالیبراسیون	کالیبراسیون
a=-0.00002; b=0.013; c=0.251	$Y = aX^2 + bX + C$	حجم آنی
a=0.00009; b= 0.006	$Y = aX + b$	جذب آب
a=-0.000002; b=0.001; c=0.01	$Y = aX^2 + bX + C$	مسیرزهکشی



شکل۸ نمودارکالیبراسیون تغییرحجم‌آبی سلول‌داخلی



شکل ۹ نمودار نرخ جذب آب در طول زمان در سلول داخلی



شکل ۱۰ نمودار کالیبراسیون تغییرحجم آبی مسیر زهکشی

به هر حال، ممکن است با گذشت زمان تغییراتی در دستگاه مذکور ایجاد شود. لذا ضروری است سلول دو جداره و متعلقات مربوط به‌صورت ادواری مجدداً کالیبره شوند تا اثرات تغییرات جدید دستگاه در معادلات کالیبراسیون منظور گردد.

کنترل عملکرد دستگاه. هدف از انجام آزمایش با دستگاه سه‌محوری مورد استفاده در این پژوهش، تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی یک خاک رسی تحت بار غیرایزوتروپیک $\left(K = \frac{\sigma_3'}{\sigma_1'} \neq 1\right)$ می‌باشد. منحنی مشخصه رطوبتی خاک، نشان‌دهنده‌ی تغییرات رطوبت وزنی، حجمی و یا درجه اشباع خاک با تغییر مکش ماتریک است[36]. معمولاً در آزمایشگاه این منحنی به کمک داده‌های به‌دست آمده از دستگاه صفحه فشار تعیین می‌گردد. لیکن در این روش اولاً داده‌های به‌دست آمده پیوسته نیستند و ثانیاً اعمال بار

غیرایزوتروپیک مشخص روی نمونه امکان‌پذیر نمی‌باشد. در دستگاه سه‌محوری اصلاح‌شده علاوه بر این‌که معایب دستگاه صفحه فشار مرتفع می‌شود، انجام انواع آزمایش‌های مقاومتی تحت مکش ثابت و نیز دیگر آزمایش‌های مربوط نیز ممکن می‌گردد[31].

منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک را می‌توان یکی از روابط اساسی‌در خصوص بیان خواص مکانیکی خاک‌های غیراشباع محسوب نمود. با استفاده از این منحنی می‌توان مقاومت برشی، ضریب نفوذپذیری، درصد رطوبت و درجه اشباع خاک را در مکش‌های مختلف برای خاک مورد نظر به‌دست آورد [14,36].شکل و خصوصیت این منحنی به عوامل متعددی مانند نوع خاک، درجه‌ی تراکم، درصد رطوبت تراکم و اثر اعمال بار بستگی دارد. محققانی از قبیل Miller et al[25] اثر نوع خاک و درجه تراکم آن را بر روی منحنی مشخصه‌ی رطوبتی بررسی و نتیجه‌گیری نمودند که این دو عامل نقش مهمی در شکل و وجود این منحنی دارند. هم‌چنین، Marinho and Chandler [22]و Tin jum et al[35] اثر رطوبت اولیه را بر روی این منحنی و برای خاک‌های مختلف بررسی نمودند و به اینتیجه رسیدند که رطوبت اولیه تأثیر چندانی بر روی منحنی مشخصه‌ی رطوبتی ندارند. بررسی منابع مطالعه شده در این پژوهشنشان می‌دهد که خصوصیات منحنی مشخصه‌ی آب و خاک تحت بار غیرایزوتروپیک $(K \neq 1)$تاکنون مورد کنکاش قرار نگرفته است.

انتخاب خاک و تهیه‌ی نمونه. خاک انتخابی اولیه برای انجام آزمایش‌ها از جنس یک خاک رسی با ۸ درصد ماسه، ۱۱ درصد سیلت و ۸۱ درصد رس، حد روانی ۵۰/۶ و حد خمیری ۳۱ درصد بود. بر اساس طبقه‌بندی McKeen [24] این خاک در دسته خاک‌های با پتانسیل تورم کم قرار می‌گیرد. لذا، با توجه به این‌که هدف از انجام این مطالعه، تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک‌های متورم‌شونده در حالت غیرایزوتروپیک بود، خاک اولیه با درصدهای متنوعی از بنتونیت مخلوط شد و روی نمونه‌های تهیه شده از این مخلوط‌های خاک و بنتونیت،آزمایش تورم آزاد (ASTM D4546) انجام گردید.در نهایت، با توجه به این‌که هرچه میزان بنتونیت بیش‌تر باشد، زمان لازم برای رسیدن نمونه‌ی تهیه شده از مخلوط خاک و بنتونیت به حالت تعادل رطوبتی افزایش می‌یابد، در نهایت تصمیم گرفته شد که از مخلوط خاک و ۱۰ درصد بنتونیت در تهیه‌ی نمونه جهت انجام آزمایش استفاده گردد. پس از اختلاط خاک با ۱۰ درصد بنتونیت، مجدداً آزمایش حدود آتربرگ بر این مخلوط انجام شد و مشخص گردید حد خمیری و روانی آن به‌ترتیب به مقادیر ۴۱/۳ و ۱۲۲/۹ درصد افزایش یافته است. این خاک مطابق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید، در طبقه‌یCH(رس با پلاستیسیته بالا) قرار می‌گیرد. سپس با انجام آزمایش تراکم، حداکثر دانسیته‌ی خشک و رطوبت بهینه‌ی خاک مذکور به‌ترتیب برابر با ۱۹/۲٪ و ۱/۷۱ gr/cm^3 به‌دست آمد. در نهایت، برای آماده‌سازی نمونه‌ها و آغاز آزمایش‌ها، نمونه‌های سیلندری به ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر و با رطوبت حدود ۱۴ درصد (۵/۲ درصد کم‌تر از میزان رطوبت بهینه) تهیه گردید. به‌منظور آن‌که نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های این پژوهش یکنواخت و تکرارپذیر باشند، یک قالب مخصوص طراحی و ساخته شد که از سه قسمت مجزا تشکیل شده بود. هر قسمت این قالب از وسط به دو قسمت کوچک‌تر تقسیم شده بود. برای تهیه‌ی هر نمونه، مقدار۷۰۰ گرم خاک با میزان رطوبت ۱۴ درصد تهیه شد و به مدت ۲۴ ساعت در کیسه‌های نایلونی نگهداری شد تا به حالت تعادل رطوبتی برسد.سپس خاک مرطوب حاصل در سه لایه و به‌روش استاتیکی با سرعت بارگذاری ۱/۵ mm/min [11] در قالب مذکور متراکم گردید و سپس با حذف قسمت‌های زائد، نمونه خاک برای انجام آزمایش تهیه گردید.قبل از نصب نمونه در دستگاه، اقدامات اولیه آماده‌سازی دستگاه که شامل اشباع نمودن سنگ متخلخل با عدد ورود هوای زیاد (HAED)بود انجام شد و سپس نمونه مطابق روش Sivakumar and Wheeler [33] در

دستگاه نصب گردید.

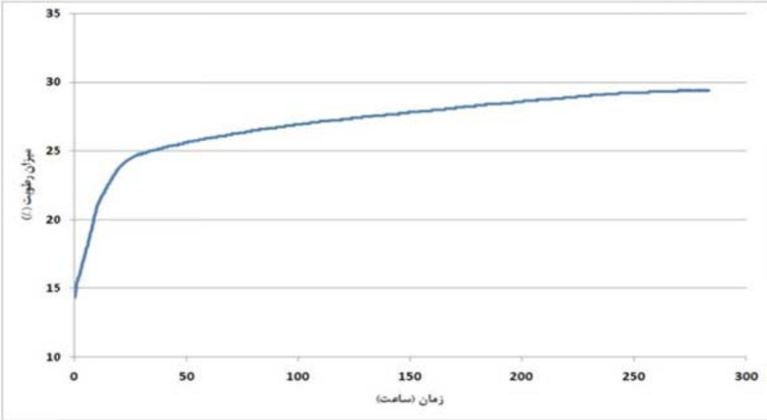
مراحل انجام آزمایش. مکش اولیه درنمونه‌ای که متراکم شده و در دستگاه جهت آزمایش قرار داده شده است مشخص نیست. لذا در ابتدا می‌بایست مکش نمونه را به یک مقدار مشخص رسانید. به همین دلیل، همه‌ی آزمایش‌هایی که بر خاک‌های غیراشباع انجام می‌شود شامل دو مرحله می‌شود: مرحله‌ی تعادل و مرحله‌ی اصلی آزمایش.

مرحله‌ی تعادل (Equalization Stage). هدف از انجام این مرحله ایجاد یک مکش مشخص در نمونه است. بدین منظور، یک فشار هوای مشخص (u_a) از بالای نمونه و یک فشار آب مشخص(u_w) از پایین نمونه و از طریق صفحه‌ی متخلخل با عدد ورود هوای بالا به نمونه که در دستگاه، تحت فشار جانبی غیرایزوتروپیک $(\sigma_3 > u_a)\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} \neq 1$ قرار دارد اعمال می‌گردد[۱۰]. لذا مکش ایجاد شده در نمونه برابر با $S_u = u_a - u_w$ خواهد بود. به‌طور مثال اگر مکش ۵۰ کیلوپاسکال موردنظر باشد، با انتخاب $u_a =$ ۱۰۰kPa و $u_w =$۵۰kPa می‌توان این مکش را ایجاد نمود. مدت زمان لازم برای ایجاد مکش به‌روش فوق در نمونه به نوع خاک و مکش اولیه‌ی نمونه بستگی دارد. طی این زمان، بسته به میزان رطوبت اولیه و مکش اولیه‌ی نمونه، آب می‌تواند به نمونه وارد و یا از آن خارج شود. این مدت می‌تواند بین ۷ تا ۱۰ روز به طول بینجامد. محققانی مانند[31]Sharma و Rampinoet al [29] بیان نمودند که مرحله‌ی ایجاد تعادل زمانی خاتمه می‌یابد که میزان آب خروجی یا ورودی به نمونه به مقدار کم‌تر از ۰/۱ $\frac{cm^3}{day}$ برسد. در این پژوهش، فشار هوا (u_a) و فشار آب منفذی(u_w) اعمال شده به نمونه به‌ترتیب برابر با ۳۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انتخاب گردید و بدین ترتیب مکش حاصل برابر با ۵۰ kPa شد. برای تمامی نمونه‌ها همین مراحل ایجاد مکش ۵۰kPa انجام شد.

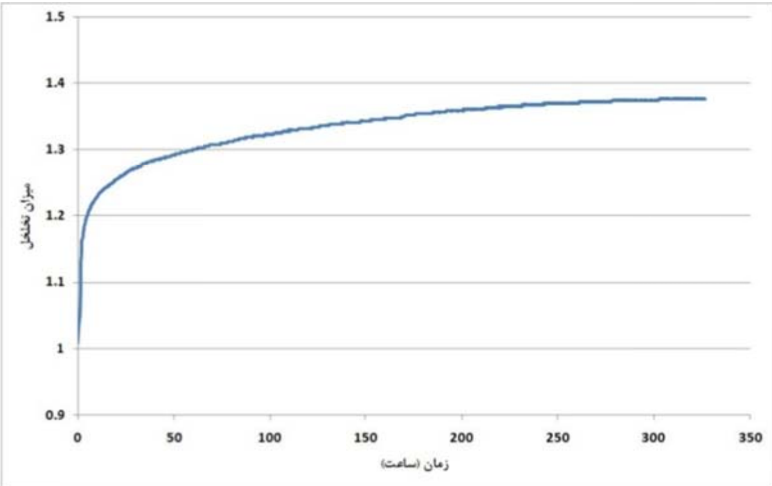
مرحله‌ی تغییر مکش. پس از آن‌که مکش مورد نظر در نمونه ایجاد شد، مرحله‌ی اصلی آزمایش را می‌توان آغاز نمود و مکش را کاهش یا افزایش داد. در این تحقیق تنها افزایش مکش مدنظر بوده است. برای انجام این کار، فشار هوا (u_a) ثابت نگه داشته شده و فشار آب (u_w) با یک سرعت خاص کاهش می‌یابد [38]. سرعت کاهش فشار آب منفذی بستگی به نوع خاک دارد [31]. وی پس از بررسی‌های لازم، سرعت کاهش مکش را برابر ۰/۸ $\frac{kPa}{hour}$ پیشنهاد نمود. از این مقدار پیشنهادی در تحقیق حاضر نیز استفاده گردید، به‌گونه‌ای که تغییر مکش از ۵۰ کیلوپاسکال به ۳۰۰ کیلوپاسکال حدود ۱۵ روز به طول می‌انجامید.

نتایج

بر اساس اطلاعات ثبت شده در طول مدت زمان رسیدن نمونه به حالت تعادل برای ایجاد مکش ۵۰ کیلوپاسکال و اعمال مقادیر کالیبراسیون، تغییرات نسبت تخلخل و رطوبت نمونه محاسبه گردید.نمونه‌ای از نتایج در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، طی مدت رسیدن نمونه به مکش ۵۰ kPa، میزان رطوبت و نسبت تخلخل نمونه افزایش می‌یابد. این بدان معناست که مکش اولیه‌ی نمونه بیش‌تر از ۵۰ کیلوپاسکال بوده است ولذا آب به سمت نمونه جریان پیدا می‌کند. تا این‌که مکش به مقدار ۵۰ کیلوپاسکال برسد. در نهایت، بر اساس اطلاعات حاصل از مراحل مختلف آزمایش، منحنی‌های مشخصه‌ی رطوبتی خاک برای مقادیر مختلف $\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$ تعیین شده و در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مطابق شکل، مکش اولیه‌ی ایجاد شده در نمونه برابر ۵۰ کیلوپاسکال است که به‌صورت تدریجی به ۳۰۰ کیلوپاسکال می‌رسد. نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک نشان داد که شکل این منحنی برای یک نوع خاک، تحت تأثیر تنش‌های اعمال شده به آن خاک قرار دارد. این مسأله با نتایج Miller et al [25] مطابقت دارد.

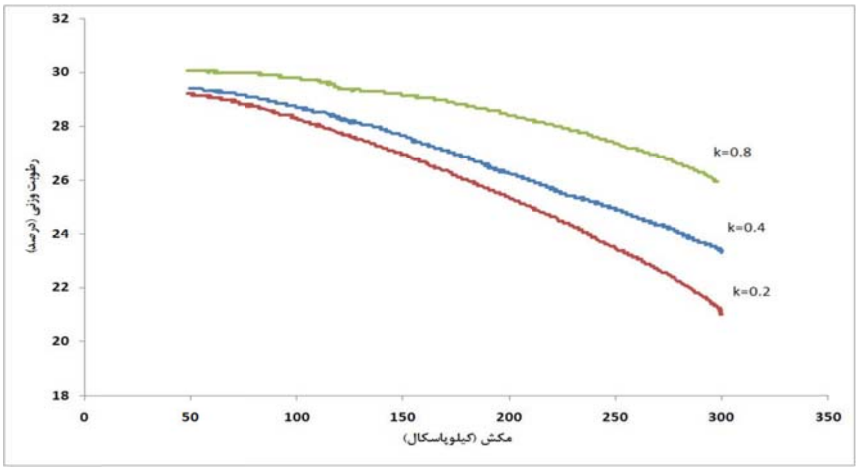


شکل ۱۱– الف



شکل ۱۱ – ب

شکل ۱۱ تغییرات الف) میزان رطوبت و ب) نسبت تخلخل طی مدت زمان رسیدن نمونه به مکش ۵۰ kPa برای K=۰/٤



شکل ۱۲ منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک تحت آزمایش در نسبت‌های غیرایزوتروپیک مختلف

نتیجه‌گیری

دستگاهی جدید و ساده با اندازه‌گیری بسیار دقیق تغییرحجم کلی نمونه طراحی و ساخته شده است. از لحاظ استفاده از سیستم سلول دوگانه، این دستگاه شبیه به‌دستگاه Wheeler [37] است. یکی از این موارد، سیستم اندازه‌گیری تغییرحجم است. در دستگاه ویلر، تغییرحجم نمونه از طریق تغییر ارتفاع آب در لوله‌ی بورت انجام می‌گرفت. برخی از محققان برای تعیین تغییرحجم آب در سلول داخلی از بورت و برای تعیین تغییرحجم آب منفذی از دستگاه Constant Volume Change استفاده کردند[31,33] (معایب استفاده از بورت در بخش ۱-۲ ذکر شد).اما در این دستگاه، استفاده از Constant Volume Change برای هر دو مورد تغییرحجم آب منفذی و سلول داخلی باعث شد که علاوه بر امکان اندازه‌گیری تغییرحجم با دقت میلی‌مترمکعب، اندازه‌گیری‌ها نیز همگی به‌صورت تمام اتوماتیک انجام می‌شود. این خاصیت برای آزمایش بر روی نمونه‌های غیراشباع که بسیار زمان‌بر هستند، قابل ملاحظه است.

از این‌رو، ویژگی میزه‌ی دیگر این دستگاه نسبت به‌دستگاه‌های قبلی آن است که دستگاه حاضر، به‌صورت کاملاً خودکار عمل می‌کند. این خاصیت، استفاده از این دستگاه را بسیار آسان‌تر می‌سازد. ویژگیسوم، استفاده از Servo Motor در مکانیزم کاهش یا افزایش فشار است. ذکر شد که Sharma[31] در دستگاه خود از Stepper Motor استفاده کرده بود و عیب آن نیز عنوان گردید (بخش ۱-۲).

هم‌چنین، در سلول‌های دوگانه Wheeler [37] و Sivakumar[33] سلول داخلی کاملا در سلول خارجی قرار می‌گرفت و پرنمودن سلول‌ها از بالا انجام می‌شد. این مشکل توسط Sharma [31] با جداسازی کامل دو سلول از هم، قرار دادن مسیر ورود آب در پایین سلول‌ها و قرار دادن دو منفذ برای تخلیه‌ی هوا در بالای آن‌ها حل شد. در این دستگاه نیز از روش Sharma [31] در طراحی سلول‌ها استفاده شده است.

نتایج نشان دهنده‌ی آن است که طی عمل افزایش مکش، با افزایش نسبت $\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$، تغییرات درصد رطوبتکاهش می‌یابد. دلیل وقوع این پدیده را این‌گونه می‌توان بیان نمود که با افزایش نسبت $\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$، در واقع تنش‌های وارد به نمونه افزایش می‌یابد و لذا حجم خلل و فرج در نمونه رو به کاهش می‌گذارد. لذا رطوبت کم‌تری در نمونه وجود خواهد داشت که حین عمل افزایش مکش از نمونه خارج می‌گردد.

نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها چنین می‌نماید که:
۱- منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک تحت هر شرایطی از اعمال بار قابل حصول است. ۲- منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک تابعی از اعمال بار وارد به خاک است.
۳- در شرایط بارگذاری غیرایزوتروپیک، در یک مکش ثابت، با افزایش نسبت $\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$، مقدار رطوبت کاهش می‌یابد.

مراجع

1. Arunasalam, R.,"Coupling of mechanical behaviour and water retention behaviour in unsaturated soils", PhD thesis, University of Glasgow, Glasgow, UK., (2009)
2. Bishop, A. W. & Blight, G. E.,"Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated soils",*Géotechnique*, 13(3), pp. 177-197, (1963).
3. Bishop, A.W., and Donald, I.B.,"The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus", *In Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, Paris, pp. 13–21, (1961).

4. Bocking, K. A. and Fredlund, D.G., "Limitations of the axis translation technique", *Proceeding of 4th International Conference on Expansive soils*, Denver, 117-135, (1980).

5. Chiu, C.F.,"Behaviour of unsaturated loosely compacted weathered materials", PhD thesis, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, (2001).

6. Cui, Y.J. and Delage, P.,"Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt",*Géotechnique*, 46(2), pp. 291-311, (1996).

7. Delage, P., Romero, E. and Tarantino, A.,"Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils', Proceedings *Of The First Uropean Conference On Unsaturated Soils*, E-Unsat 2008, Durham, United Kingdom, July 2–4, (2008).

8. Dineen, K. and Burland, J.B.,"A new approach to osmotically controlled oedometer testing", *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, 2, 459-465, (1995).

9. Drumright, E.,"Shear strength for unsaturated soils", PhD thesis, University of Colorado, Fort Collins, Colo, (1987).

10. Estabragh, A.R., Javadi, A.A. and Boot, J.C.,"The effect of compaction pressure on consolidation behaviour of unsaturated silty soils", *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 540-550, 41(3), (2004).

11. Estabragh, A.R. and Javadi, A.A.,"Critical state for overconsolidated unsaturated silty soil", *Canadian Geotechnical Journal*, 45(3), pp. 408-420, (2008).

12. Esteban, V. and Saez, J., " A device to measure the swelling characteristics of rock samples with control of the suction up to very high values",*Proc. ISRM Symposium on Rock Mechanics and Power Plants*, Madrid, 2, (1988).

13. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R.,"Stress state variables for unsaturated soils",*Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Proceedings, ASCE (GT5), 103, pp. 447-466, (1977).

14. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.,"*Soil Mechanics for Unsaturated Soils*", New York: Wiley Inter Science, (1993).

15. Hilf, J. W.,"An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils";*Technical Memo 654, Denver*, *Bureau of Reclamation*, (1956).

16. Kassif, G. and Ben Shalom, A.,"Experimental relationship between swelling pressure and suction",*Géotechnique*, 21(3), pp. 255-259, (1971).

17. Komornik, A., Livneh, M. and Smucha, S.,"Shear strength and swelling of clays under suction",*Proceedings of 4th International Conference on Expansive soils*, Denver, CO, 1, pp. 206-226, (1980).

18. Khan, M.H. and Hoag, D.L.,"A noncontacting transducer for measurement of lateral strains",*Canadian Geotechnical Journal*, 16, pp. 409–411, (1979).

19. Lagerwerff, J.V., Ogata, G. and Eagle, H.E., "Control of osmotic pressure of culture solutions with

polyethylene glycol", *Science*, 133, pp. 1486-1487, (1961).

20. Lloret, A, Villar, M.V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X. and Alonso, E.E.,"Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes", *Géotechnique*, 53(1), pp. 27-40, (2003).
21. Macari, E.J., Parker, J.K. and Costes, N.C.,"Measurement of volume changes in triaxial tests using digital imaging techniques",*GeotechnicalTesting Journal*, 20(1), pp. 103–109, (1997).
22. Marinho, F.A. and Chandler, R.J.,"*Aspects of the behavior of clays on drying*", Unsaturated soils Geotechnical special publication, 39, S. Houston and W. Wray, eds., ASCE, New York, (1993).
23. Matyas, E.L. and Radhakrishna, H.S.,"Volume change characteristics of partially saturated soils",*Géotechnique*, 18 (4), pp. 432-448, (1968).
24. McKeen, R.G.,"A model for predicting expansive soil behavior", *Proc. 7th Int. Conf. on Expansive Soils*, 1, Dallas, pp. 1–6, (1992).
25. Miller, C. J., Yesiller, N., Yaldo, K. and Merayyan, S.,"Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic",*J. Geotech. Eng*., ASCE,128(9), pp.733–742, (2002).
26. Ng, C.W.W. and Chiu, C.F.,"Behaviour of a loosely compacted unsaturated volcanic soil",*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(12), pp. 1027–1036, (2001).
27. Ng, C.W.W., Zhan, L.T. and Cui, Y.J.,"A new simple system for measuring volume changes in unsaturated soils",*Canadian Geotechnical Journal*, 39,pp. 757-764, (2002).
28. Padilla, J.M., Houston, W.N., Lawrence, C.A., Fredlund, D.G., Houston, S.L. and Perez, N.P.,"An Automated Triaxial Testing Device for Unsaturated Soils",*Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, April 2-6, Carefree, AZ., pp. 1775-1786, (2006).
29. Rampino C., Mancuso C. and Vinale F.,"Laboratory testing on an unsaturated soil", equipement, procedures, and first experimental results,*Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), pp. 1-12, (1999).
30. Romero, E., Lloret, F., Gen, J.A. and Alonso, E.E.,"A new suction and temperature controlled triaxial apparatus",*In Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1, pp. 185–188, (1997).
31. Sharma, R.S.,"Mechanical behavior of unsaturated highly expansive clays", PhD Thesis, Oxford University, (1998).
32. Sivakumar, V.,"A critical state framework for unsaturated soils", PhD Thesis, University of Sheffield, (1993).
33. Sivakumar, R.,"Effects of anisotropy on the behaviour of unsaturated compacted clay", PhD thesis, Queen’s UniversityBelfas, (2005).
34. Tarantino, A., Mongiovi, L. and Bosco, G.,"An experimental investigation on the independent

isotropic stress variables for unsaturated soils",*Géotechnique*, 50(3), pp. 285-292, (2000).

35. Tinjum, J.M., Benson, C.H. and Blotz, L.R.,"Soil-water characteristic curves for compacted clays",*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(11), pp. 1060 – 1069,(1997).
36. Vanapalli, S.K., Pufahl, D.E. and Fredlund, .G.,"Relationship between soil-water characteristic curves and the as-compacted water content versus soil for a clay till", XI Pan-*American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brazil, August 8-12, 2, pp. 991-998. (1999).
37. Wheeler, S.J., "The stress-strain behavior of soils containing gas bubbles", PhD thesis, Oxford University, U.K.,(1986).
38. Wheeler, S.J. and Sivakumar V.,"An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil",*Géotechnique*, 45(1), pp. 35–53, (1995).
39. Zakaria, I.,"Yielding of unsaturated soil", PhD thesis, University of Sheffield, UK, (1995).
40. Zur, B.,"Osmotic control of the matric soil-water potential", *Soil Sci.*, 102, pp. 394-398, (1966).